

桑沟湾营养盐时空分布及营养盐限制分析

张继红¹ 蒋增杰¹ 王 巍¹ 邹 建¹ 薛素艳¹ 方建光¹
连 岩² 张新军² 刘新杰² 周颖敏²

(¹农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(²荣成市渔业技术推广站, 264300)

摘 要 根据 2006 年 4、7、11 月和 2007 年 1 月共 4 个航次的调查数据, 分析了桑沟湾水体的溶解无机氮(DIN)、活性磷酸盐(PO_4^{3-})和活性硅酸盐(Si)含量的时空分布特征, 采用营养盐浓度阈值法和化学计量法对桑沟湾营养盐潜在的限制性进行了分析。结果显示, 桑沟湾 DIN、 PO_4^{3-} 、Si 含量及分布呈现出明显的季节变化: DIN 在秋季最高, 春季最低; PO_4^{3-} 在秋季最高, 夏季最低; Si 在夏季最高, 秋季最低。春季 DIN 和 PO_4^{3-} 的含量低于理论上浮游植物生长的营养盐阈值的站位分别占 44% 和 39%; 夏季 PO_4^{3-} 的潜在限制性较强, 浓度低于营养盐阈值的站位占 68%, 受 PO_4^{3-} 潜在限制的几率达 79%, DIN 和 Si 分别为 5% 和 0; 秋、冬季 Si 可能是浮游植物生长的主要限制因子。讨论了海水养殖、陆源输入及外海交换对营养盐时空分布的影响。目前, 桑沟湾营养盐浓度基本属于国家一类、二类水质。但是, 长期变化趋势显示 DIN 有上升的趋势。

关键词 营养盐分布 季节变化 营养盐限制因子 海水养殖 桑沟湾

中图分类号 X821 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2010)04-0016-10

Seasonal distribution and variation of nutrients and nutrients limitation in Sanggou Bay

ZHANG Ji-hong¹ JIANG Zeng-jie¹ WANG Wei¹ ZOU Jian¹ XUE Su-yan¹
FANG Jian-guang¹ LIAN Yan² ZHANG Xin-jun² LIU Xin-jie² ZHOU Ying-min²

(¹Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fishery Resources, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

(²Rongcheng Fisheries Research Institute, 264300)

ABSTRACT The distribution of dissolved nutrients in Sanggou Bay was investigated in April, July and November 2006 and January 2007. The concentration and distribution of dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate (PO_4^{3-}) and silicate in Sanggou Bay showed obvious seasonal variation. DIN reached the lowest level in spring and the highest level in autumn; PO_4^{3-} concentration was at the lowest level in summer and the highest level in autumn; while Si concentration reached the lowest point in autumn and the highest point in summer. Limiting nutri-

国家 973 课题(2006CB400608)、国家自然科学基金(40676093)、国家支撑计划课题(2008BAD95B11、2006BAD09A09)和国家 863 课题(2006AA100307)共同资助

收稿日期:2009-09-16; 接受日期:2009-12-11

作者简介:张继红(1969-),女,博士,研究员,主要从事养殖生理生态学及容量评估研究。E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85822957

ents for the growth of phytoplankton were assessed by the method of theoretical half-saturation constant (K_s) and stoichiometric ratios among DIN, PO_4^{3-} and SiO_3^{2-} . The results showed that in spring, the percentage of stations with concentration of DIN and PO_4^{3-} below K_s was 44% and 39%, respectively, suggesting for potential N and P limitation. In summer, the percentage of stations with PO_4^{3-} concentrations below K_s was 68%, and potential P-limitation was at 79% probability, N and Si limitation were at 5% and 0% probability, respectively. In autumn and winter, Si was the major limiting nutrient, and the potential Si-limitation was at 94% and 78% probability, respectively. The effect of mariculture activities, land-based input, and water exchange with Yellow Sea on the space-time distribution of nutrients were discussed. Based on the long-term data, more attention should be paid to DIN enrichment in Sanggou Bay.

KEY WORDS Nutrient distribution Seasonal variation Nutrient limitation
Mariculture Sanggou Bay

海水贝藻类养殖业已成为对海洋经济高速增长起主要推动作用的产业。但是,快速的发展带来了诸多的问题,如病害频繁发生,环境污染加重,食品安全问题日益突出等,实现养殖产业的发展与环境保护并重,是我国海水养殖业面临的严峻课题。生源要素是养殖生态系统中物质循环的基础,支撑着养殖生态系统的正常运转。生源要素的通量及结构比例变化在很大程度上控制着养殖生态系统的可持续生产能力。因此,了解和认识养殖海域生源要素的时空变化及营养限制情况,弄清海水养殖对生态环境的压力或影响,对建立可持续的养殖技术与模式有着重要的意义。桑沟湾位于山东半岛东端,总面积 133.3 km²,通过宽 10 km 的湾口与黄海相连。自 20 世纪 80 年代开始大规模养殖活动,目前已成为我国北方重要的半封闭型海湾规模化海水养殖示范区。关于桑沟湾营养盐分布特征及营养盐限制分析已有一些报道(宋云利等 1996;刘慧等 2003;曲克明等 2008),但是,近年的研究报道较少,尤其是缺乏桑沟湾全湾大面调查研究的数据资料。本文综合分析了 2006~2007 年 4 个航次的大面调查资料,旨在了解和掌握桑沟湾目前的水质营养状况及时空变动情况,为有效保护桑沟湾生态环境,同时,为桑沟湾健康生态养殖管理提供科学指导。

1 材料与方 法

1.1 样品的采集

调查站位、等深线及桑沟湾的养殖布局情况见图 1。图 1 显示,共设置 19 个调查站位,于 2006 年 4 月 28~29 日、7 月 12~13 日、11 月 15~16 日和 2007 年 1 月 12~13 日分别采集代表性季节的水样。1# 站位为湾外的非养殖区,2#~4# 站位为海带养殖区,5#~7#、10#~12# 站位为贝藻混养区,13# 站位为网箱养殖区,其他站位为贝类筏式养殖区。4 月和 11 月在 13# 站位没有取样;1 月份有 4 个站位(8#、12#、15# 和 17#)的数据缺失。所有样品均按《海洋监测规范》规定的方法采集、处理和保存。溶解氧、水温和盐度等指标使用美国 YSI-6600 型水质分析仪现场测定。

1.2 样品分析

样品的分析按照《海洋调查规范》中的要求执行。水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后,分别采用次溴酸钠氧化法、锌-镉还原法及重氮-偶氮法测定 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及 NO_2^- -N;分别采用磷钼蓝法及硅钼蓝法测定可溶性活性磷酸盐和活性硅酸盐。叶绿素 *a* 的测定方法参照 Parsons 等(1984)所描述的荧光法,水样经 0.45 μm 滤膜过滤,90% 丙酮萃取后,用荧光计测定。

1.3 营养盐限制的评价方法

营养盐限制的评价方法采用氮、磷、硅的含量水平以及三者之间的比值进行判断。首先,采用营养盐限制

的阈值法,以理论上的营养盐半饱和常数(Theoretical half-saturation constant (K_s))为评价标准($N = 2 \mu\text{mol/L}$; $P = 0.2 \mu\text{mol/L}$; $Si = 2 \mu\text{mol/L}$)(Fisher *et al.* 1992),分析桑沟湾浮游植物生长的营养盐限制情况。原则是如果测定的某种营养盐浓度低于 K_s ,则视该种营养盐为浮游植物生长的限制性因子;如果测定的营养盐浓度高于 K_s ,则根据 Justic 等(1995)和 Dortch 等(1992)提出的评估营养盐限制的方法——化学计量法,分析某种营养盐的潜在限制性,即:(1)若 $Si/P > 22$ 且 $N/P > 22$,则磷酸盐为限制因子;(2)若 $N/P < 10$,且 $Si/N > 1$,则无机氮为浮游植物生长的限制因子;(3)若 $Si/P < 10$,且 $Si/N < 1$,则硅酸盐为限制因子。

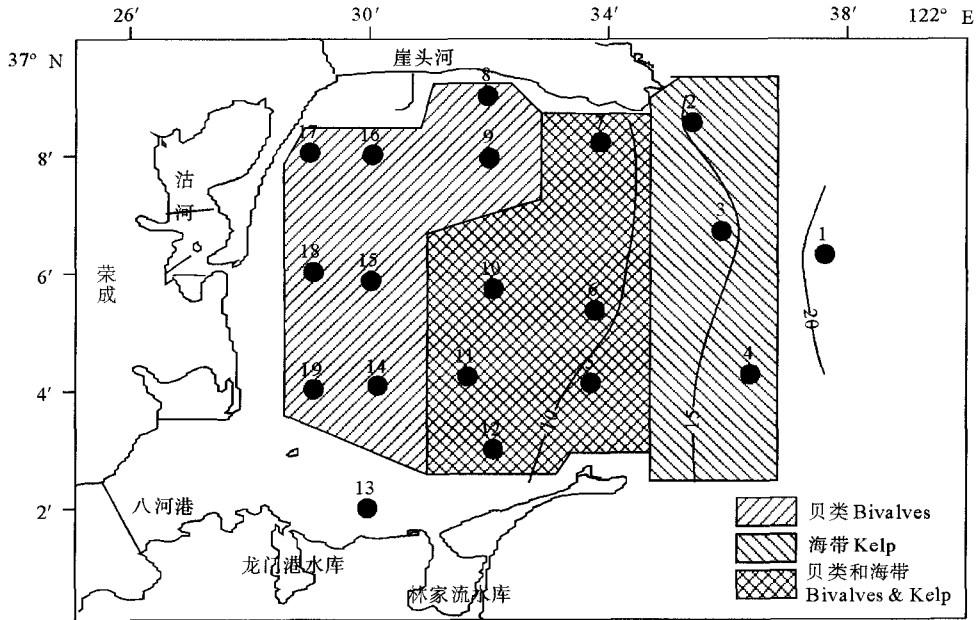


图 1 桑沟湾海域调查站位、养殖布局及等深线

Fig. 1 Survey stations, mariculture distribution and water depth contour in Sanggou Bay

2 结果与分析

2.1 基本理化因子的季节变化

2.1.1 水温

湾内水比较浅,平均水深为 7.5 m,从湾底向湾口递增,湾口附近递增的幅度比较大。由于桑沟湾内湾水深较浅,因此,水温受气温、光照等环境条件的影响较大,春季、夏季湾内的水温升温快,湾内高于湾口。夏季湾口与湾内的水温差达 $5.06 \text{ } ^\circ\text{C}$;秋、冬季降温快,湾内水温明显低于湾口(图 2)。4 个航次的温度范围为 $4.24 \sim 20.19 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

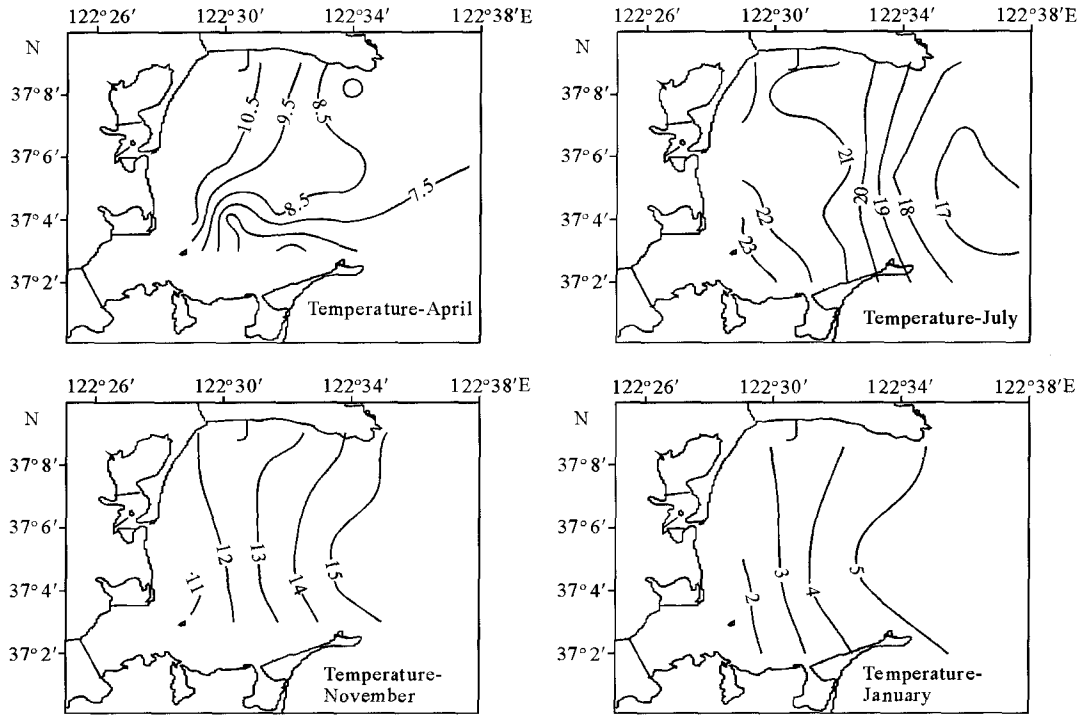
2.1.2 盐度

桑沟湾盐度的总体趋势是湾内低于湾外,冬季盐度高,夏季盐度低。1 月和 11 月海水的盐度梯度变化不大(平均值分别为 32.05 ± 0.13 和 31.85 ± 0.20),7 月盐度梯度变化较大,湾底的盐度显著低于湾中和湾口,受陆地径流或降雨的影响较大。

2.2 桑沟湾营养盐的季节变化

表 1 给出桑沟湾 4 个季节营养盐的平均浓度。氮、磷浓度基本符合国家一类或二类水质标准。

总溶解无机氮(DIN)在 11 月份浓度最高(平均为 $15.84 \pm 6.22 \mu\text{mol/L}$),1 月份次之,4 月份浓度最低(平均为 $3.08 \pm 1.85 \mu\text{mol/L}$),即秋季最高,春季最低;而活性磷酸盐的最高值也是在 11 月份,最低值出现在 7 月份(平均值为 $0.18 \pm 0.11 \mu\text{mol/L}$,低于浮游植物生长的理论半饱和浓度的下限);硅酸盐浓度相对氮磷来讲季节性变化较小,呈现夏高秋低的趋势。



注:各月份水温等值线的间隔都为 1 °C

Note: Interval for monthly water temperature contour was 1 °C

图 2 桑沟湾四季水温的空间分布情况

Fig. 2 Spatial distribution of temperature in Sanggou Bay

表 1 桑沟湾海区 4 个季节营养盐平均浓度及氮磷、硅氮比

Table 1 The average concentration of dissolved nutrients and mole ratio of N/P and Si/N in Sanggou Bay

月份 Month	溶解无机氮 Total DIN($\mu\text{mol/L}$)	磷酸盐 $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{mol/L}$)	硅酸盐 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ($\mu\text{mol/L}$)	硅磷比 Si/P Ratio	氮磷比 N/P Ratio	硅氮比 Si/N Ratio
4 月 April	3.08 ± 1.85	0.24 ± 0.092	3.87 ± 1.55	17.22 ± 12.75	15.71 ± 14.35	1.96 ± 1.80
7 月 July	7.97 ± 4.80	0.18 ± 0.11	5.69 ± 0.88	53.25 ± 51.22	76.99 ± 88.63	0.97 ± 0.58
11 月 November	15.84 ± 6.22	0.88 ± 0.37	3.07 ± 0.48	4.06 ± 1.93	19.03 ± 7.06	0.23 ± 0.12
1 月 January	11.38 ± 3.87	0.60 ± 0.20	4.10 ± 0.71	7.69 ± 2.55	21.78 ± 12.02	0.39 ± 0.12

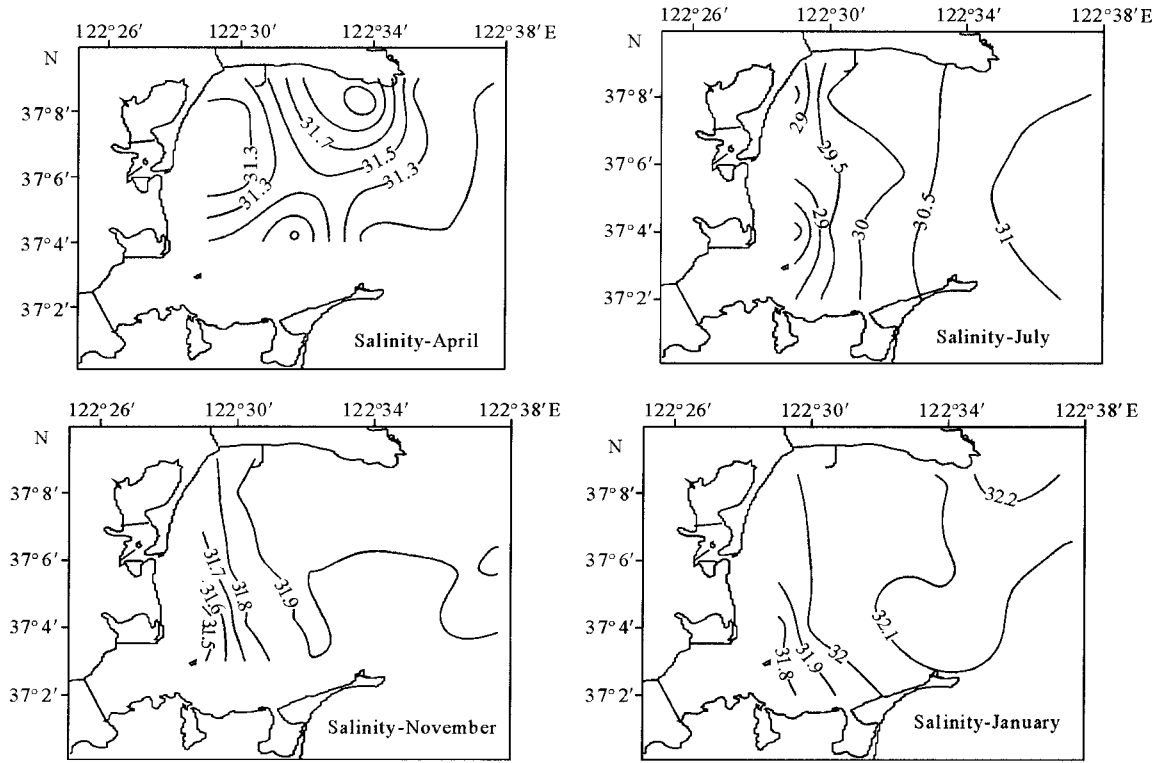
图 4 显示桑沟湾溶解性无机氮的分布情况。7、11 及 1 月的 DIN 都是以硝酸盐为主,氨氮次之。4 月份桑沟湾的湾口区域,硝酸盐是无机氮的主要成分,在近岸和湾中部的贝类养殖区以氨氮为主,氨氮为主的站位占 60% 以上,这可能与贝类的氨氮排泄活动有关。

2.3 桑沟湾营养盐的平面分布特征

图 5(A、B、C)显示桑沟湾 4 个季节氮、磷、硅的分布情况。

春季:春季湾内无机氮、磷酸盐的分布趋势非常相似,都是从西南部向东北方向呈舌状递增趋势。湾内尤其是湾底部(10[#]、11[#]、12[#]、14[#]、15[#]和 19[#] 站位)氮的浓度低于浮游植物生长所需的阈值(2 $\mu\text{mol/L}$)。

夏季:7 月份无机氮的低值区,出现在湾的中南部区域,湾底西北部出现了高值区域,次高值区在湾外的 1[#] 站附近,说明陆地径流和外海水交换同时补充湾内的营养盐。全湾无机氮的平均浓度是春季的两倍。全湾的磷酸盐浓度很低,均值为(0.18 \pm 0.11) $\mu\text{mol/L}$,低于浮游植物生长所需浓度的下限(0.2 $\mu\text{mol/L}$)。磷酸盐和硅酸盐的平面分布趋势相近,全湾的分布比较均匀,中部、北部区域略低。



注:等值线的间隔 4月为 1;7月为 0.5;11月为 0.1,1月为 0.2

Note: Interval for salinity contour for April, July, November and January were 1, 0.5, 0.1 and 0.2, respectively

图3 桑沟湾四季盐度的空间分布情况

Fig.3 Spatial distribution of salinity in Sanggou Bay

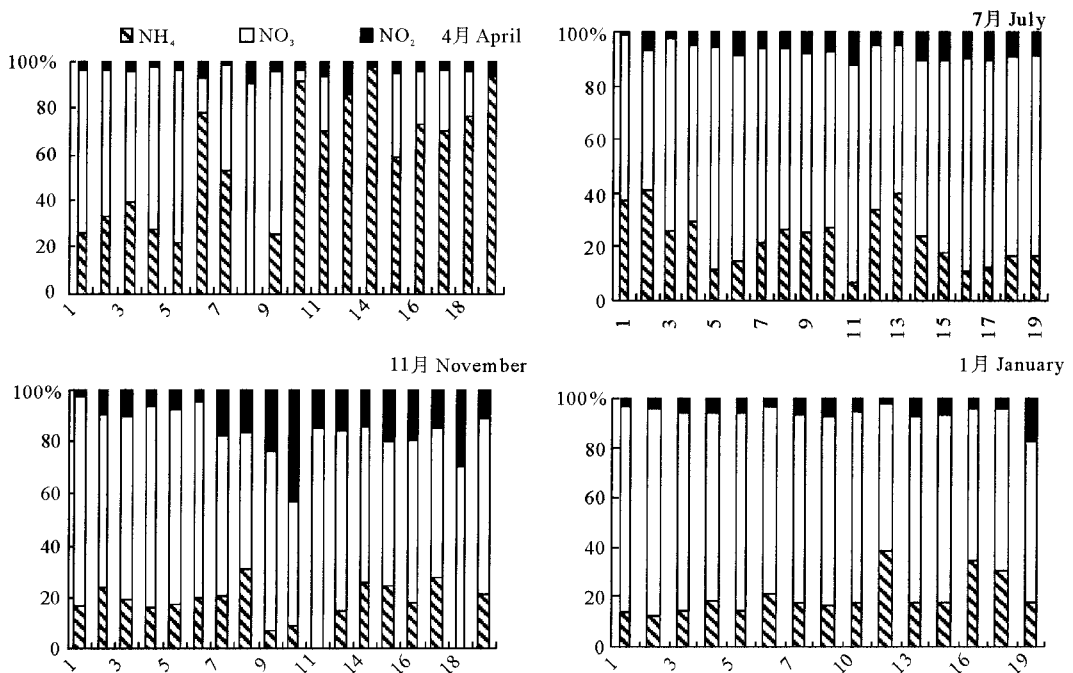


图4 桑沟湾溶解性无机氮的分布

Fig.4 Nutrient structure of DIN in Sanggou Bay

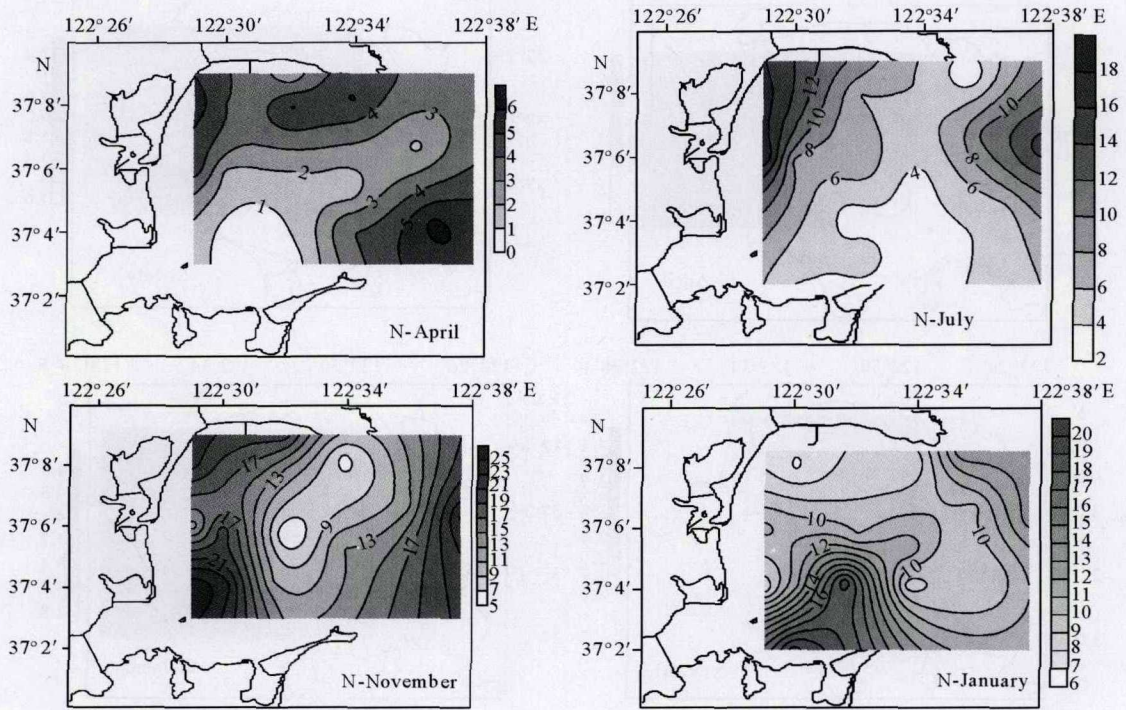


图5-A

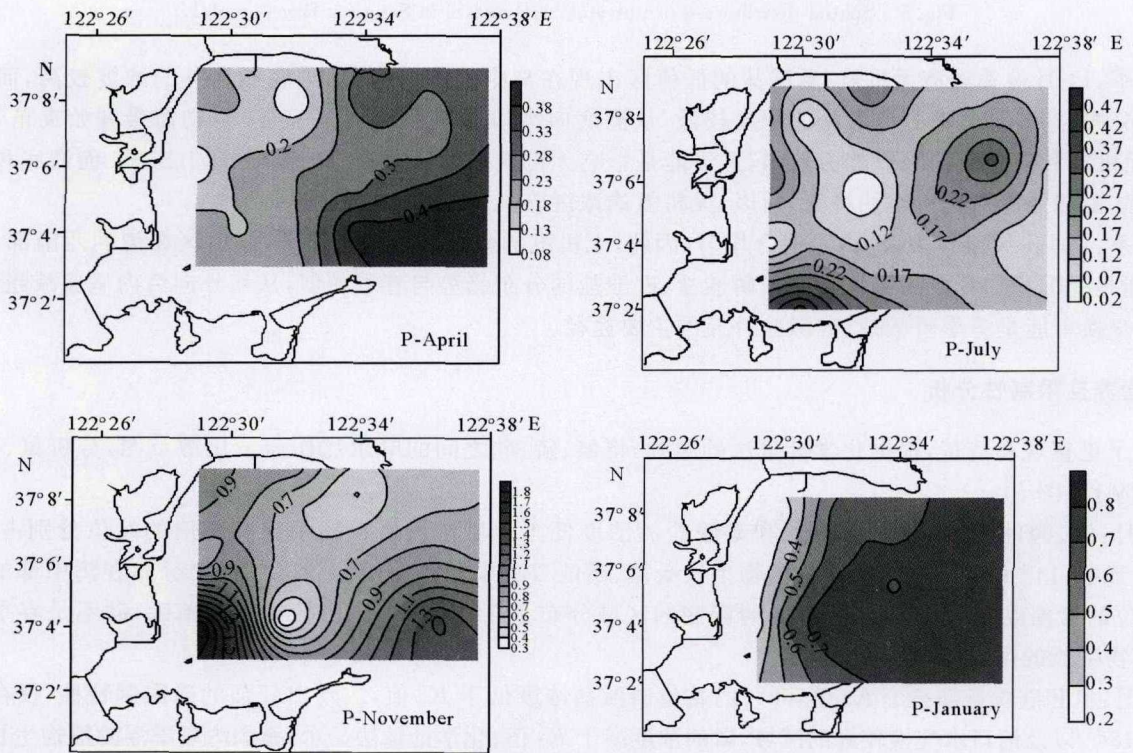


图5-B

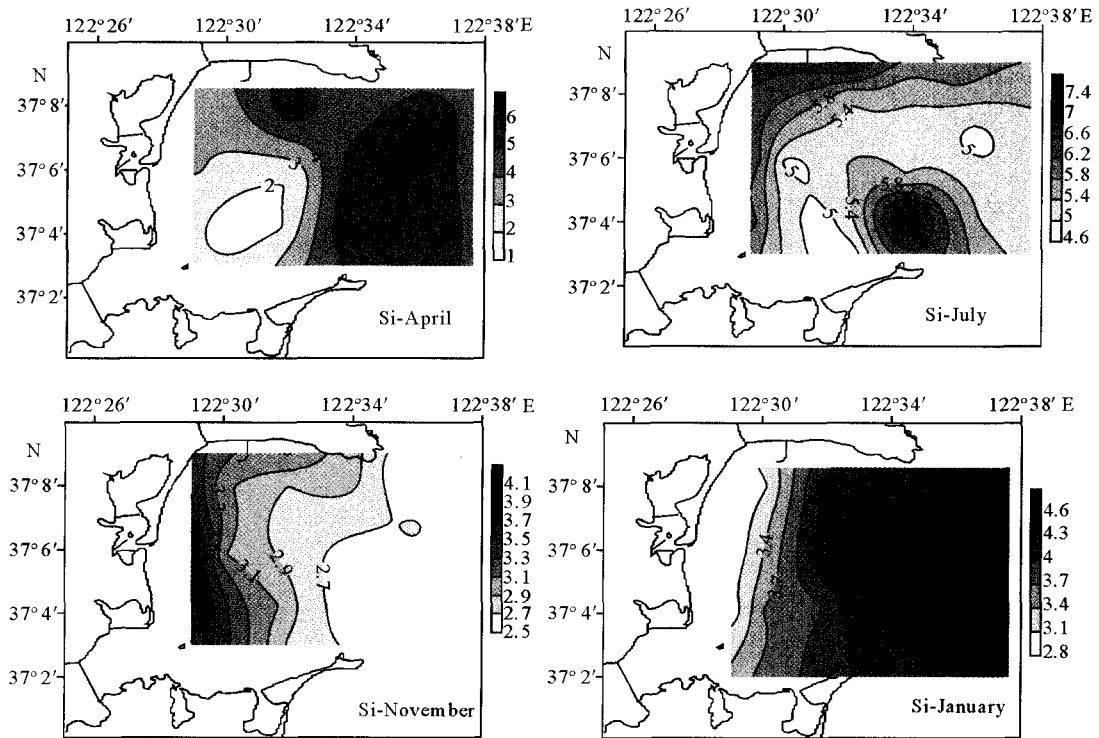


图5-C

注:A. 溶解性无机氮;B. 磷酸盐;C. 硅酸盐 Note: A. DIN; B. $PO_4\text{-P}$; C. $SiO_3\text{-Si}$

图5 桑沟湾氮、磷、硅营养盐的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of nutrient N,P and Si in Sanggou Bay ($\mu\text{mol/L}$)

秋季:11月份桑沟湾无机氮、磷酸盐的低值区出现在湾中偏湾口附近,湾底和湾外的浓度较高,而硅酸盐的平面分布与其不同,湾外硅酸盐的浓度较低,从湾底向湾口递增。10月底至11月初海带开始夹苗,生长旺盛,对无机氮和磷酸盐的吸收能力较强,这可能是影响无机氮平面分布趋势的主要原因之一。而湾底和湾口外分别有陆源和外海对无机氮的补充,所以,无机氮的浓度较高,大于 $17 \mu\text{mol/L}$ 。

冬季:1月份风浪较大,湾内水混合均匀,因此,无机氮的分布区域性不显著,高值区在湾的西南部,分析原因,可能是受沉积物释放的影响。冬季磷酸盐、硅酸盐的分布趋势与春季相似,从湾外向湾内呈递减趋势,说明外海水交换可能是冬季磷酸盐、硅酸盐补充的主要途径。

2.4 营养盐限制性分析

为了更直观和清楚,根据化学计量法的原则,将氮、磷、硅之间的摩尔比作原子比散点图,分析氮、磷、硅的潜在限制性(图6)。

4月:氮、磷的浓度较低,无机氮和磷酸盐的浓度低于浮游植物生长的半饱和阈值的站位分别占44%和39%。其中,14[#]和15[#]站位的浮游植物生长受氮、磷的双重限制。氮限制的区域主要分布在湾中部的10[#]~15[#]站位的贝藻混养区和贝类养殖区;磷限制的区域分布于14[#]~17[#]站位的贝类养殖区;硅不是春季桑沟湾浮游植物生长的主要限制因子。

7月:氮和硅含量都高于 K_s 值,68%的站位磷酸盐浓度低于 K_s 值,表现出较强的磷限制特性,仅在湾底的17[#]和18[#],以及湾口水交换较好的区域,磷的浓度高于 K_s 值;化学计量法显示,桑沟湾夏季浮游植物生长受控于单一营养盐限制的几率分别为:氮5%、磷79%、硅0。可见,磷酸盐对浮游植物生长的潜在限制性最大。

11月:氮、磷、硅3种营养盐的浓度都高于 K_s 值。根据化学计量法,桑沟湾秋季浮游植物生长受控于硅的几率为94%,受控于氮、磷的几率都是0。

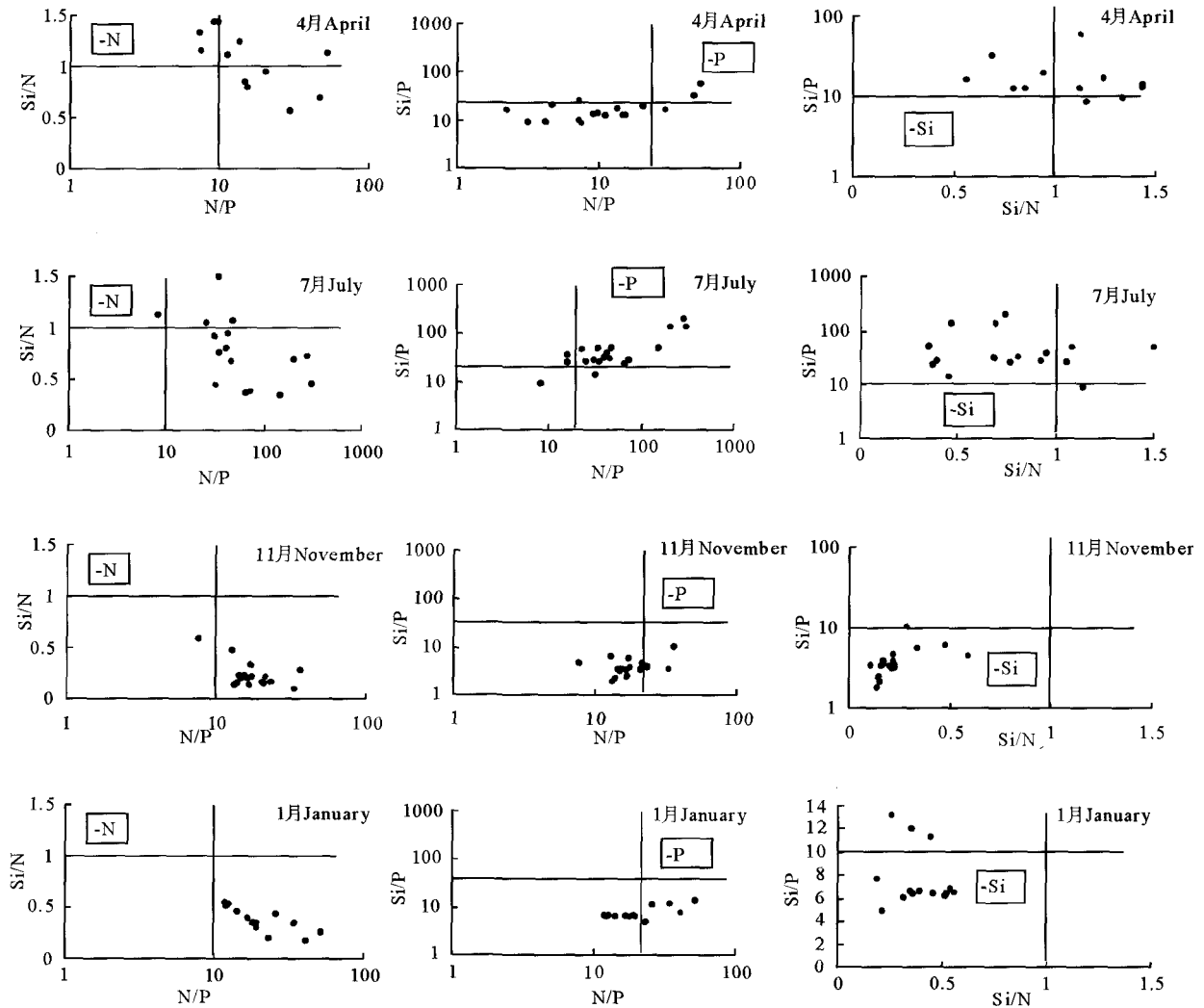


图 6 桑沟湾四季营养盐原子比散点

Fig. 6 Scatter diagram of atomic nutrient ratio in Sanggou Bay

1 月:该月的营养盐限制情况与 11 月非常相似,氮、磷、硅 3 种营养盐的浓度都高于 K_s 值。化学计量法显示硅酸盐的潜在限制性较强,14 个调查站位中,有 11 个站位为硅潜在性限制,氮、磷不是浮游植物生长的限制性因子。

2.5 桑沟湾营养盐浓度的长期变化趋势

将本文 4 个航次的调查结果与收集的已有桑沟湾历史数据进行了比较(图 7)。历史数据主要来源于已发表的论文、专集及我们调查收集的数据,取相同月份全湾调查数据的平均值(肖作贤 1988;季如宝等 1998;宋云利等 1996;孙丕喜等 2007)。结果显示,除 4 月外,其他 3 个月份的溶解性无机氮都呈线性增加的趋势。溶解性无机氮 DIN 的浓度与时间(年)的关系如下:7 月: $DIN = 0.309 T - 0.061 (R^2 = 0.699)$;11 月: $DIN = 0.468 T - 923.71 (R^2 = 0.626)$;1 月: $DIN = 0.257 T - 508 (R^2 = 0.432)$ 。

3 讨论

桑沟湾海域营养盐浓度的时空分布特性是自然与人类活动共同作用的结果。春季水温回暖,光照强度适宜,浮游植物生长旺盛,加上养殖海带的生物量已经接近最高,浮游植物与养殖大型藻类的共同作用,使得湾内的营养盐大量消耗。桑沟湾无大河注入,入湾的河流有沽河、崖头河、桑沟河等,均为季节性河流。4 月份,盐

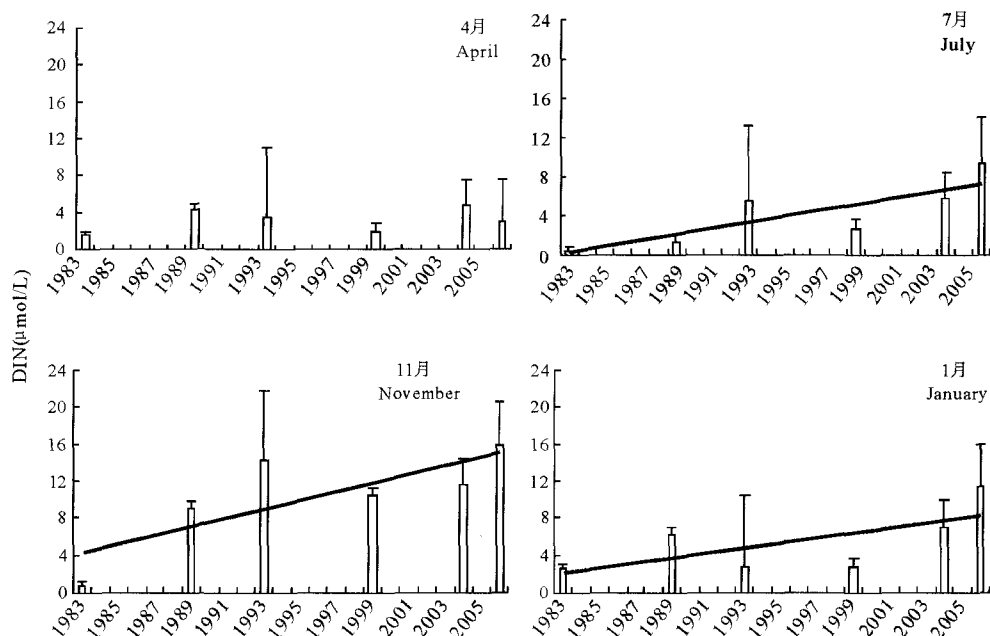


图7 桑沟湾溶解性无机氮的长期变化趋势
Fig. 7 Long-term trend of DIN in Sanggou Bay

度与氮、磷、硅浓度没有显著的负相关关系($P > 0.05$),说明陆地径流对营养盐的补充很少。春季营养盐的补充主要依靠外海水交换的输入。由于该季节海带及扇贝养殖笼对水流的阻碍作用较强,从湾口到湾底的流速衰减近70%(魏皓等 2010)。以往的结果也显示,由于养殖筏架、生物的阻挡,养殖中心区流速减慢54%(Grant *et al.* 2001)。桑沟湾西南部的的水交换时间最长(大约19 d)(Duarte *et al.* 2003),富含营养盐的新鲜水难以向该区扩散和输送。另外,本项目组对湾内颗粒物动力过程的观测结果显示,由于湾内养殖设施和养殖生物对波浪的衰减作用,使得湾内的颗粒物、底层营养盐很难进入上层(樊星等 2010)。由于浮游植物的生长繁殖和海带的生长,将该区域的氮、磷营养盐几乎消耗殆尽,因此桑沟湾内氮、磷成为浮游植物生长的限制性因子,尤其是西南部区域氮、磷的营养盐浓度较低,呈现氮、磷的双重限制。

比较无机氮与盐度的平面分布(图3、图5)可以看出,夏季降雨量较大,陆源输入淡水增多使得湾内盐度降低,盐度分布中冲淡水以宽带形向东伸展,等值线几乎与海岸线平行。盐度的分布格局与无机氮极其相似,无机氮浓度与盐度有显著的线性负相关关系($DIN = 0.309 T - 0.061, R^2 = 0.699, P < 0.05$),可见,7月陆地径流是桑沟湾近岸无机氮的主要来源之一。养殖海带的收获一般始于5月,持续到7月,收获的顺序是从湾内浅水区逐渐向湾口深水区。7月,湾内养殖的海带几乎收获完毕,只有在湾口附近水深的区域还有部分海带尚未收获,该区域的氮营养盐浓度相对较低,可能与海带生长消耗有关。同时,也反映了湾口区域来自陆源营养盐的补充较少。通常溶解性无机氮比磷消耗的早,无机氮在春季耗尽,磷酸盐在夏季耗尽(Gibson *et al.* 1997),桑沟湾氮、磷的季节性变化也符合这一规律。

从季节性变化来看,溶解性无机氮含量为秋季>冬季>夏季>春季,与宋云利等(1996)调查结果略有不同(秋季>夏季>春季>冬季)。宋云利等(1996)认为,4月份沽河的营养盐输入是导致桑沟湾春季的无机氮含量上升的原因。随着对富营养化危害的认识提高,对陆源营养盐输入的控制加强,而且河流的径流量减少,河流输入的营养盐通量减少(荣成市环保局提供的资料)。溶解性无机氮的季节性变化特性,可能与长期的贝藻养殖活动有关。贝类的粪便、脱落的海带沉积在湾底,底质中富集了大量的营养物质,冬季1月份海带的长度尚在1m左右,对海流的阻挡作用与4月份(海带的长度已达3m以上)相比小很多,另外,冬季的风浪较大,促进了底质中营养盐物质的释放。

营养盐限制性的分析和评估方法有很多,包括与浮游植物生长的理论半饱和常数比较法(Fisher *et al.* 1992),溶解性氮、磷摩尔比法(Redfield *et al.* 1963; Fisher *et al.* 1992),总氮、磷摩尔比法(Magnien *et al.*

1992),营养盐添加实验法(Delia *et al.* 1986; 曲克明等 2008)及生态系统总体分析法等(Boynton *et al.* 1982; Malone *et al.* 1996)。目前,各种方法都存在利弊,比如营养盐添加实验法,实验持续的时间、实验水体的大小等都会对实验结果产生影响。尽管溶解性无机氮、磷摩尔比法没考虑营养盐的周转率和有机态、颗粒态营养盐的作用,但是该方法简单易行,目前使用较普遍(王勇等 1999; 刘慧等 2003)。由于桑沟湾营养盐含量较低,绝对值有时低于半饱和常数(DIN: $2 \mu\text{mol/L}$; PO_4^{3-} : $0.2 \mu\text{mol/L}$; SiO_3^{2-} : $2 \mu\text{mol/L}$),所以,本文采用理论半饱和常数和溶解性氮、磷、硅摩尔比法相结合的方法,分析了4个季节桑沟湾的营养盐限制性情况。同以往的结果相比,桑沟湾营养盐限制表现出明显的季节性差异,已经由整体的氮限制转变为春、夏季磷限制为主,秋、冬季潜在硅限制为主,氮限制仅出现在春季的湾底和湾中区域(刘慧等 2003; Duarte *et al.* 2003)。

桑沟湾贝藻的大规模养殖在一定程度上起到了净化海水的作用,使得桑沟湾的营养盐浓度远远低于乳山湾(幸福言等 2004)、胶州湾(Shen 2001)等其他同处于黄海海域的海湾,水质状况良好,通常符合国家一类或二类海水水质标准。尽管如此,从1983年桑沟湾大规模养殖前至今,桑沟湾溶解性无机氮的含量呈上升的趋势,DIN与时间拟合直线的斜率显示11月DIN增加最快,其次是夏季7月,养殖自身的污染问题应引起关注。

参 考 文 献

- 王勇,焦念志. 1999. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步研究. 海洋与湖沼, 30(5): 512~518
- 孙丕喜,张朝晖,郝林华,王波,王宗灵,刘萍,连岩,常忠岳,谢琳萍. 2007. 桑沟湾海水中营养盐分布及潜在性富营养化分析. 海洋科学进展, 25(4): 436~445
- 刘慧,方建光,董双林,王立超,连岩. 2003. 莱州湾和桑沟湾养殖海区主要营养盐的周年变动及限制因子. 中国水产科学, 10(3): 227~234
- 曲克明,宋云利,徐勇,孙耀,方建光. 2008. 桑沟湾养殖水域春季和夏季营养限制的现场实验. 海洋环境科学, 27(2): 124~127
- 季如宝,毛兴华,朱明远. 1998. 贝类养殖对海湾生态系统的影响. 黄渤海海洋, 16(1): 21~27
- 肖作贤. 1988. 国家海洋局第一海洋研究所. 桑沟湾增养殖环境综合调查研究. 青岛: 青岛出版社, 61~88
- 幸福言,陈碧鹃,曲克明,宋建忠,李秋芬,马绍赛. 2004. 乳山湾表层海水COD与氮、磷营养盐的分布及其营养状况. 海洋水产研究, 25(5): 52~56
- 宋云利,崔毅,孙耀,方建光,孙慧玲,杨琴芳,匡世焕. 1996. 桑沟湾养殖海域营养状况及其影响因素分析. 海洋水产研究, 17(2): 41~52
- 樊星,魏皓. 2010. 近岸典型养殖海区潮流垂直结构的数值研究. 渔业科学进展, 31(4): 78~84
- 魏皓,赵亮,原野等. 2010. 桑沟湾水动力特征及其对养殖容量影响的研究——观测与模型. 渔业科学进展, 31(4): 65~71
- Boynton, W. R., Kemp, W. M., and Keefe, C. W. 1982. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production. In: Kennedy VS (ed.), Estuarine Comparisons, Academic Press, New York, 69~90
- Delia, C. E., Sanders, J. G., and Boynton, W. R. 1986. Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: Phytoplankton growth in large-scale, continuous cultures. Can. J. Fish. Aqua. Sci. 43: 397~406
- Dortch, Q., and Whitley, T. E. 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions. Continental Shelf Research, 12: 1 293~1 309
- Duarte, P., Meneses, R., Hawkins, A. J. S., *et al.* 2003. Mathematical modeling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters. Ecol. Modeling, 168: 109~143
- Fisher, T. R., Peele, E. R., Ammerman, J. W., and Harding, L. W. Jr. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. Mar. Ecol. Prog. Ser. 82: 51~63
- Gibson, C. E., Stewart, B. M., and Gowen, R. J. 1997. A synoptic study of nutrients in the north-west Irish Sea. Est. Coast. Shelf Sci. 45: 27~38
- Grant, J., and Bacher, C. 2001. A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay. Can. J. Fish. Aqua. Sci. 58: 1 003~1 011
- Justic, D., Rabalais, N. N., and Turner, R. E. 1995. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. Mar. Poll. Bull. 30(1): 41~46
- Magnien, R. E., Summers, R. M., and Sellner, K. G. 1992. External nutrient sources, internal nutrient pool, and phytoplankton production in Chesapeake Bay. Estuaries, 15: 497~516
- Malone, T. C., Conley, D. J., Fisher, T. R., Gilbert, P. M., Harding, L. W., and Sellner, K. G. 1996. Scales of nutrient-limited phytoplankton productivity in Chesapeake Bay. Estuaries, 19: 371~385
- Parsons, T. R., Malta, Y., and Laddi, C. M. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. New York: Pergamon Press, 173
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H., and Richard, F. A. 1963. The influence of organism on the composition of seawater in the sea, Vol. 2. John Wiley, New York, 26~77
- Shen, Z. L. 2001. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52: 211~224